

# PREDICCIÓN EMPÍRICA EN EL ATLÁNTICO NORTE: INVIERNO DE 1976 Y VERANO DE 1994

Emilia SÁNCHEZ GÓMEZ y María José ORTIZ BEVIÁ

*Departamento de Física, Universidad de Alcalá*

## RESUMEN

En este trabajo se presentan unos ejemplos concretos de una serie de pronósticos elaborados con un modelo de predicción empírica. El modelo se basa en la Descomposición en Valores Singulares de la matriz de covarianza cruzada calculada entre dos variables climatológicas: el predictor y el predictando. El campo predictor está constituido por las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el Atlántico Norte, y el campo predictando son las anomalías de la temperatura del aire a 850 hPa sobre el mismo dominio. Los ejemplos que se van a mostrar ilustran los resultados del modelo y corresponden a dos situaciones extremas: el invierno de 1976 y el verano de 1994. El modelo de predicción admite dos variantes: la primera trabaja con campos filtrados y la segunda con un esquema estacional. El análisis de los ejemplos para ambos casos muestra que el modelo sí parece reproducir el signo de las anomalías de temperatura, pero no la amplitud, a no ser que se trate de valores extremos.

**Palabras clave:** predicción, temperatura del aire, filtrado, estacional, estudios de casos.

## ABSTRACT

*In this work we present some examples among a set of forecasts performed by using an empirical forecast model. The model is based on the Singular Value Decomposition of the cross-covariance matrix between two climatic variables: the predictor and the predictand field. As predictor field we have considered the sea surface temperature anomalies over the North Atlantic basin and as predictand field the anomalous values of air temperature at 850 hPa over roughly the same domain. The case studies to be shown correspond to two extreme situations: the winter of 1976 and the summer of 1994. Our forecasts can be carried out following two different schemes: the former works on filtered fields and the latter works on seasonal fields. The analysis of the case studies for both procedures show the model can capture successfully the sign of the air temperature anomalies. However the amplitude of the anomalies is well forecasted as long as they are extreme values.*

**Key words:** prediction, air temperature, filtering, seasonal, case studies.

## 1. INTRODUCCIÓN

Presentamos aquí un estudio de dos pronósticos relevantes para la variabilidad climática en el Atlántico Norte, realizados con un modelo empírico. El modelo empírico se basa en una técnica estadística del análisis multivariante, conocida como Descomposición en Valores Singulares (SVD). La SVD (BRETHERTON et al., 1992) puede aislar relaciones lineales entre un campo predictor y otro predictando usando criterios en los que se maximiza la covarianza entre ellos.

Una descripción detallada del modelo de predicción se puede encontrar en SÁNCHEZ GÓMEZ *et al.* (2001, 2002). Básicamente el procedimiento de predicción consiste en calcular la matriz de covarianza cruzada entre dos campos. La relación causal entre predictor y predictando se obtiene introduciendo en el cálculo de la matriz un desfase, de tal manera que el predictor precede en el tiempo al predictando. La SVD proporciona unos patrones asociados a ambos campos tales que aíslan la variabilidad acoplada entre éstos. La proyección de los campos originales sobre los patrones da lugar a unos coeficientes temporales. La reconstrucción se obtiene mediante el desarrollo ortogonal de los coeficientes temporales ponderados por los vectores o patrones singulares.

El campo predictando está constituido por las anomalías de la temperatura del aire a 850 hPa (T850). Como campo predictor se ha empleado una variable oceánica: las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST). El dominio espacial para el predictor y el predictando es el Atlántico Norte (90°W-10°E, 20°N-40°N).

La calidad de las predicciones se evalúa con lo que se conoce como *habilidad de predicción* (H), que es estimada mediante la correlación entre las observaciones y las predicciones de la temperatura del aire a 850 hPa. H presenta valores útiles (por encima de 0.6) en dos zonas del dominio espacial: cerca de Bermuda y en la Península Ibérica.

El esquema de predicción admite dos variantes: la primera de ellas está orientada a la predicción a largo plazo, para ello antes de elaborar los pronósticos, el predictor y el predictando se filtran en el tiempo. El segundo trabaja con campos estacionales.

Como un ejemplo de ilustración, hemos analizado dos situaciones concretas en las que se han predicho las anomalías de la T850. Ambos casos corresponden a valores extremos de las anomalías: un enfriamiento pronunciado (invierno de 1976) y un calentamiento acusado (verano de 1994). Se van a presentar los resultados para las predicciones realizadas con los dos tipos de esquemas predictivos.

El trabajo se compone de los siguientes apartados: en la sección 2 se describen los datos empleados, en la sección 3 una breve descripción de la metodología y la selección de los ejemplos. La sección 4 es un análisis de las dos situaciones mencionadas y por último las conclusiones se presentan en la sección 5.

## 2. DATOS

Las anomalías de T850 se han obtenido a partir de los reanálisis de NCEP/NCAR para el periodo 1948-2000 (<ftp.cdc.noaa.gov>). Los datos diarios se han transformado en medias mensuales y se han calculado las anomalías restando la media mensual. La elección de la T850 tiene su origen en las integraciones realizadas en el Proyecto PROVOST (PALMER y SHUKLA, 2001) financiado por la Comunidad Europea. La T850 se usó como variable común para todas las predicciones de este proyecto porque tiene la ventaja de que está muy bien representada en los reanálisis (pertenece a la categoría A).

El campo predictor está formado por las anomalías de SST. Son datos mensuales, que se han obtenido combinando los datos de COADS (1950-1982) y de IGOSS (1982-2001). Las anomalías

se han calculado al igual que en el caso de la T850: restando la media mensual climatológica para todo el periodo. La capacidad predictiva del océano se ha puesto de manifiesto en trabajos pioneros como los de BJERKNES (1964) y RADCLIFFE y MURRAY (1970) y posteriormente en muchos de los estudios de predecibilidad empírica, entre los que destacan JOHANSSON *et al.* (1997), VAUTARD *et al.* (1998) y RODWELL y FOLLAND (2002). Estos trabajos se basan en la idea de que el océano, por sus inercias térmica y dinámica, varía en escalas temporales largas y esto constituye una fuente de predecibilidad muy importante. Por otro lado, hay muchos estudios que apuntan a que el océano podría tener un papel activo en la generación de la variabilidad atmosférica en el Atlántico Norte, y que por tanto, atmósfera y océano generarían cierta variabilidad acoplada.

### 3. METODOLOGÍA

El esquema de predicción tiene como núcleo central la SVD, una técnica lineal del análisis multivariante, muy empleada por los climatólogos. La SVD realiza una descomposición de la matriz de covarianza cruzada entre dos variables y encuentra relaciones lineales entre los campos predictor y predictando. Nosotros hemos desarrollado dos esquemas de predicción paralelos que nos permiten estudiar la predecibilidad desde dos puntos de vista distintos. El primer esquema trabaja con datos filtrados, por lo tanto se le da importancia a las escalas temporales largas más que a las cortas. El segundo esquema trabaja con campos estacionales y permite el estudio de las relaciones inter-estacionales entre los campos implicados.

El método de filtrado se basa en la convolución de dos funciones. Hay que ser cuidadosos con el procedimiento de filtrado, ya que al efectuarlo no se puede incluir ninguna información del “futuro” en lo que se conoce como periodo de entrenamiento (es el periodo de donde se estiman los parámetros del modelo y que no se predice). Se han filtrado ambos campos, predictor y predictando eliminando los periodos menores de 8 meses.

El esquema de los campos estacionales sigue un procedimiento muy similar al del trabajo de JOHANSSON *et al.* (1997). En este caso el campo predictor y el predictando se dividen en cuatro subconjuntos, atendiendo al ciclo estacional. En el caso del predictor, cada subconjunto recibe el nombre de TOR y con el número correspondiente a la estación. Por ejemplo: TOR1 es el invierno (DEF). Es importante mencionar que no se trata de medias estacionales. Cada TOR predictor realiza el pronóstico de la estación del predictando, dependiendo del tiempo de antelación con el que se quiera elaborar los pronósticos. En un trabajo que presentamos aquí, se realiza una descripción más detallada de este esquema.

En ambos esquemas se sigue el mismo procedimiento para determinar el número de modos singulares óptimo que se utiliza en la reconstrucción de los campos. Para poder realizar una comparación consistente, hay que utilizar el mismo número de modos en la reconstrucción de los campos observado y predictando. El criterio se basa en el porcentaje de varianza explicada por los primeros modos singulares y en el número de patrones necesario para reconstruir la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). De acuerdo con estos criterios, se han seleccionado los 15 primeros modos singulares. El porcentaje de varianza acumulada por estos patrones es 90 % en el caso de campos filtrados y 85 % en el caso de campos estacionales.

Una vez que se han elaborado los pronósticos se utiliza la correlación entre las predicciones y las observaciones como medida de la habilidad de predicción (H). Debido a los problemas derivados de una posible artificialidad de H, se deben realizar algunas pruebas estadísticas que den una medida de la significación estadística. La habilidad de predicción artificial tiene su origen en que la SVD puede encontrar patrones acoplados como fruto de las restricciones matemáticas y no porque realmente exista una relación física entre el predictor y el predictando. Este problema se puede solucionar utilizando campos sintéticos y comparando los resultados con el original. Una simulación de Monte Carlo permite la elaboración de un gran número de campos sintéticos de características similares a los reales.

Siguiendo los procedimientos que brevemente se acaban de describir, se han elaborado pronósticos mensuales de la T850 para el periodo 1960-2000 a diferentes plazos o antelaciones. A partir de los pronósticos mensuales hemos calculado las medias anuales y se han elaborado varios índices o series temporales promediando las anomalías observadas a una región del dominio donde las predicciones son aceptables. Esta región se corresponde con una zona oceánica cercana a Bermuda (75°W-30°W, 20°N-40°N). Este índice nos ayuda a identificar sucesos en los que los valores de las anomalías son elevados y se puede hablar de sucesos extremos. Hemos escogido dos situaciones diferentes: un enfriamiento extremo y un calentamiento extremo. Estas se corresponden con el invierno de 1976 y con el verano de 1994. Para estudiar con mayor facilidad la estructura de los campos en estos periodos, se han elaborado promedios estacionales de las anomalías y se han representado las predicciones, las observaciones y el predictor para los dos casos.

#### **4. ESTUDIOS DE CASOS: INVIERNO DE 1976 Y VERANO DE 1994**

Las series temporales de la región oceánica descrita en la sección anterior, muestran un acusado enfriamiento desde el principios de los setenta hasta el comienzo de los ochenta, seguido por un calentamiento que se prolongó hasta los noventa.

##### **4.1. Invierno de 1976**

El acusado enfriamiento en el sur del dominio ocurrido durante la década de los setenta, comenzó a finales de la década anterior. Una anomalía negativa de temperatura se formó en el centro del Atlántico Norte y persistió durante casi tres años (de primavera de 1968 hasta otoño de 1970). Al final de este periodo, las anomalías negativas se desplazaron hacia la costa americana y se debilitaron. Durante el periodo 1972-1973 surgió una anomalía positiva, presentando un máximo en la región donde se unen las aguas cálidas de la Corriente del Golfo y las aguas frías de la Corriente del Labrador. Esta situación anómala persistió hasta el invierno de 1976 y es la que se muestra en el patrón de SST en la figura 1.d y la que se utiliza para predecir las anomalías filtradas de T850 tres estaciones más tarde (figura 1.c).

En la figura 1 se presenta el estudio de caso para las predicciones realizadas con el esquema de campos filtrados. En este ejemplo particular las predicciones se han realizado con 9 meses de plazo. Se puede observar como el modelo es capaz de reproducir fielmente el signo de las anomalías en algunas regiones, sin embargo no ocurre lo mismo con la amplitud de éstas. En este ejemplo concreto el modelo predice por defecto los valores de las anomalías.

Con el esquema estacional, el pronóstico del invierno de 1976 (figura 2) realizado a 9 meses de plazo, no es tan bueno como el obtenido con los campos filtrados, sin embargo, la predicción efectuada con un año de antelación (figura 2) es bastante aceptable. Curiosamente, en este caso la predicción estima por exceso la magnitud de las anomalías de T850 en la costa este de Estados Unidos.

#### **4.2. Verano de 1994**

El calentamiento general en el sur del dominio, que persistió en la década de los noventa, comenzó a principios de 1991, con una anomalía positiva a lo largo de la costa americana acompañada de una anomalía negativa en la región del Mar del Labrador. Esta anomalía positiva evolucionó dando lugar a un calentamiento subtropical. Al final de 1992, se produjo un enfriamiento al sur de 40°N y desplazó a la anomalía positiva hacia el este, alcanzando la costa de la Península Ibérica en el verano de 1994. El patrón de SST que predice esta situación con tres estaciones de adelanto se ilustra en la figura 3.d. Las predicciones para este calentamiento son mejores que en el caso del enfriamiento, el modelo predice fielmente el signo de las anomalías pero no su magnitud.

En la figura 3 se ilustran los resultados utilizando el esquema de los campos filtrados. Se han representado también los campos originales (sin filtrar) para poder realizar la comparación.

Los resultados obtenidos con el esquema estacional se presentan en la figura 4. Las predicciones del verano de 1994 son bastante aceptables. El modelo reproduce eficientemente el signo de las anomalías positivas localizadas en Europa, zona sur del dominio, Cabo Hatteras e incluso la región del norte situada cerca de la Bahía de Baffin. Como se puede comprobar, las predicciones realizadas con 12 meses de antelación son muy fiables y dan niveles de la habilidad de predicción bastante altos.

El esquema estacional permite realizar un estudio de la dependencia de la habilidad de predicción (H) con el ciclo estacional. Los niveles de H son más altos cuando se pretende predecir la estación del verano en el campo predictando. Este hecho es consistente con las consideraciones dadas en el trabajo de BRANKOVIĆ *et al.* (1994) donde se señala que durante el verano, la variabilidad interna de la atmósfera propia de las latitudes medias con un gran componente caótico, se reduce mucho, facilitando la tarea de predecir.

#### **5. CONCLUSIONES**

Con el objeto de comprobar el funcionamiento de un esquema de predicción empírica se han presentado dos estudios de casos, que se corresponden con dos situaciones en las que las anomalías de la variable predictanda alcanza valores extremos. El campo predictando está compuesto por las anomalías de la temperatura del aire (T850) en la cuenca noratlántica y el campo predictor está constituido por las anomalías de la temperatura de la superficie del mar sobre el mismo dominio. El método empírico tiene como núcleo central una técnica del Análisis Multivariante, conocida como Descomposición en Valores Singulares (SVD). Realizando una inspección al periodo de validación, se han seleccionado dos ejemplos de predicciones: uno correspondiente a un enfriamiento (invierno de 1976) y otro correspondiente a un calentamiento (verano de 1994).

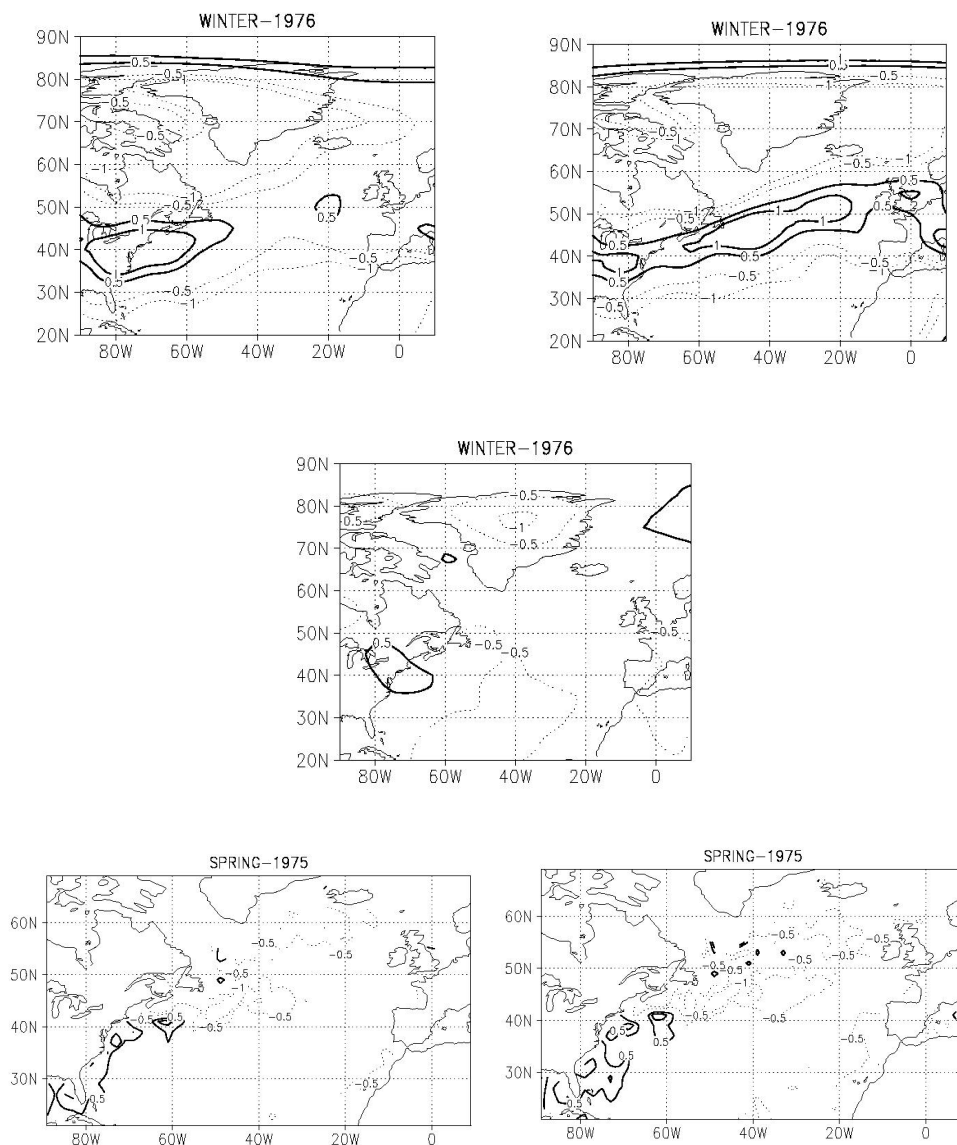


Figura 1: Campos filtrados. Ejemplo de predicción: invierno de 1976. Se presentan para su comparación las observaciones (arriba), predicciones (mitad) y estado del predictor nueve meses antes (abajo). Los campos no filtrados (derecha) se ilustran al lado de los campos filtrados (izquierda).

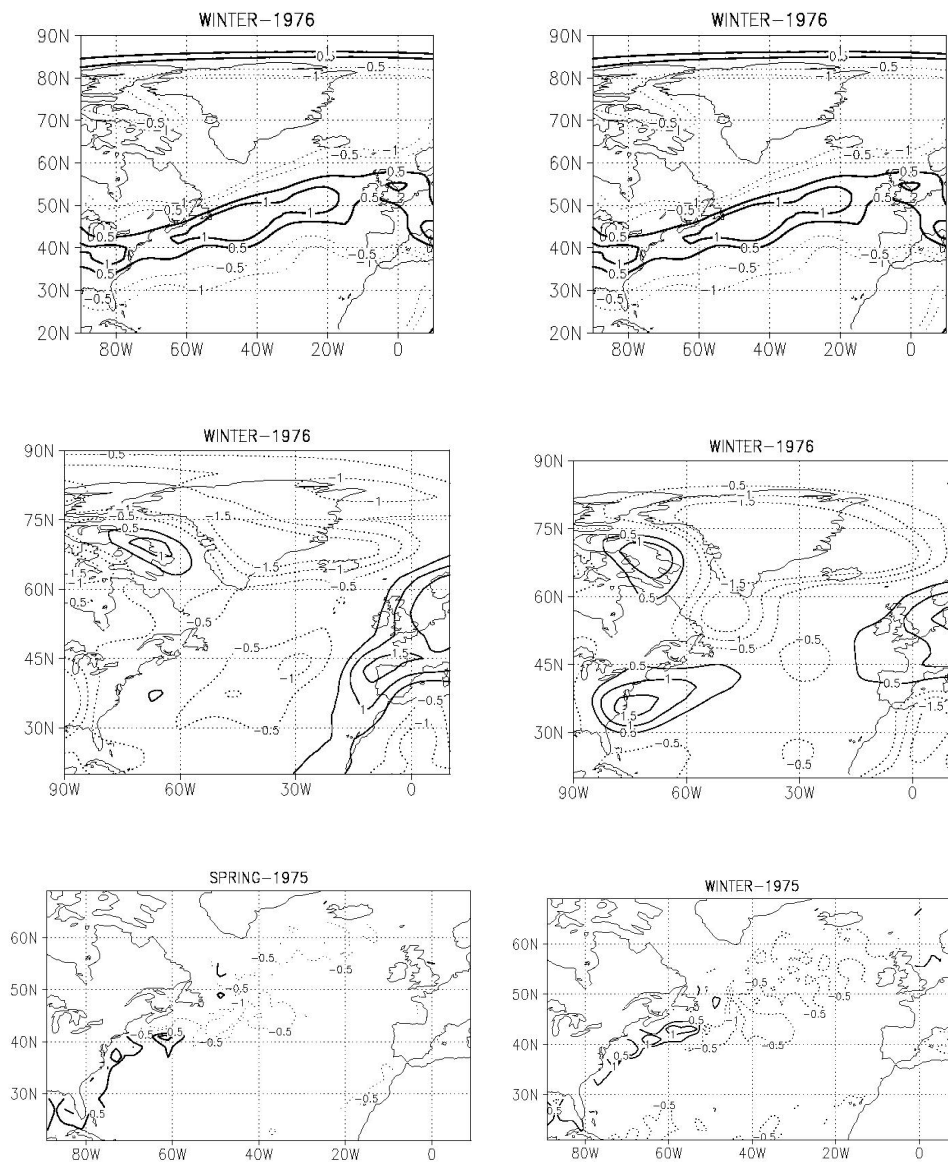


Figura 2: Campos estacionales. Ejemplo de predicción: invierno de 1976. Izquierda: predicciones a 9 meses, se presentan para su comparación las observaciones (arriba), predicciones (mitad) y estado del predictor nueve meses antes (abajo). Derecha: predicciones a 12 meses, observaciones (arriba), predicción (mitad) y estado del predictor 12 meses antes (abajo).

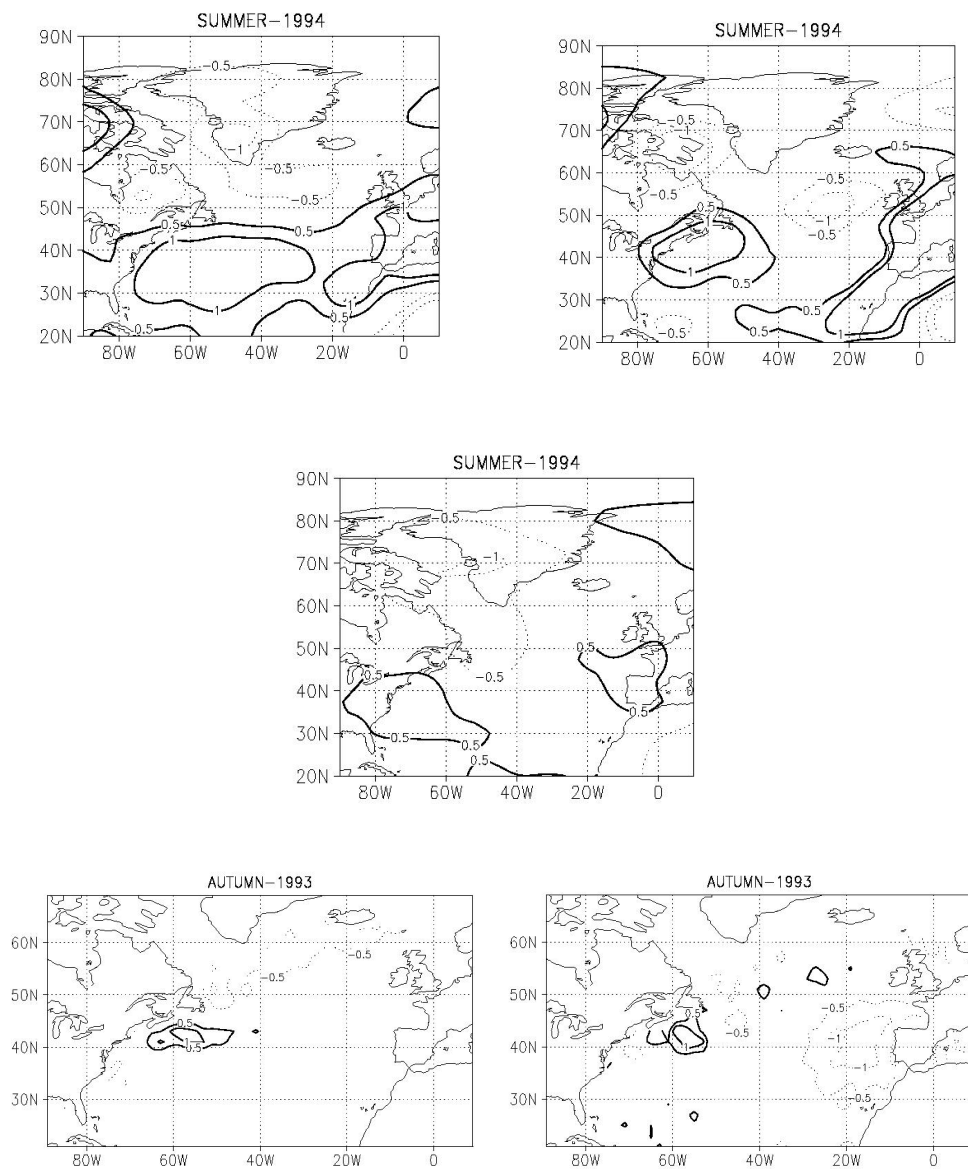


Figura 3: Campos filtrados. Ejemplo de predicción: verano de 1994. Se presentan para su comparación las observaciones (arriba), predicciones (mitad) y estado del predictor nueve meses antes (abajo). Los campos no filtrados (derecha) se ilustran al lado de los campos filtrados (izquierda).



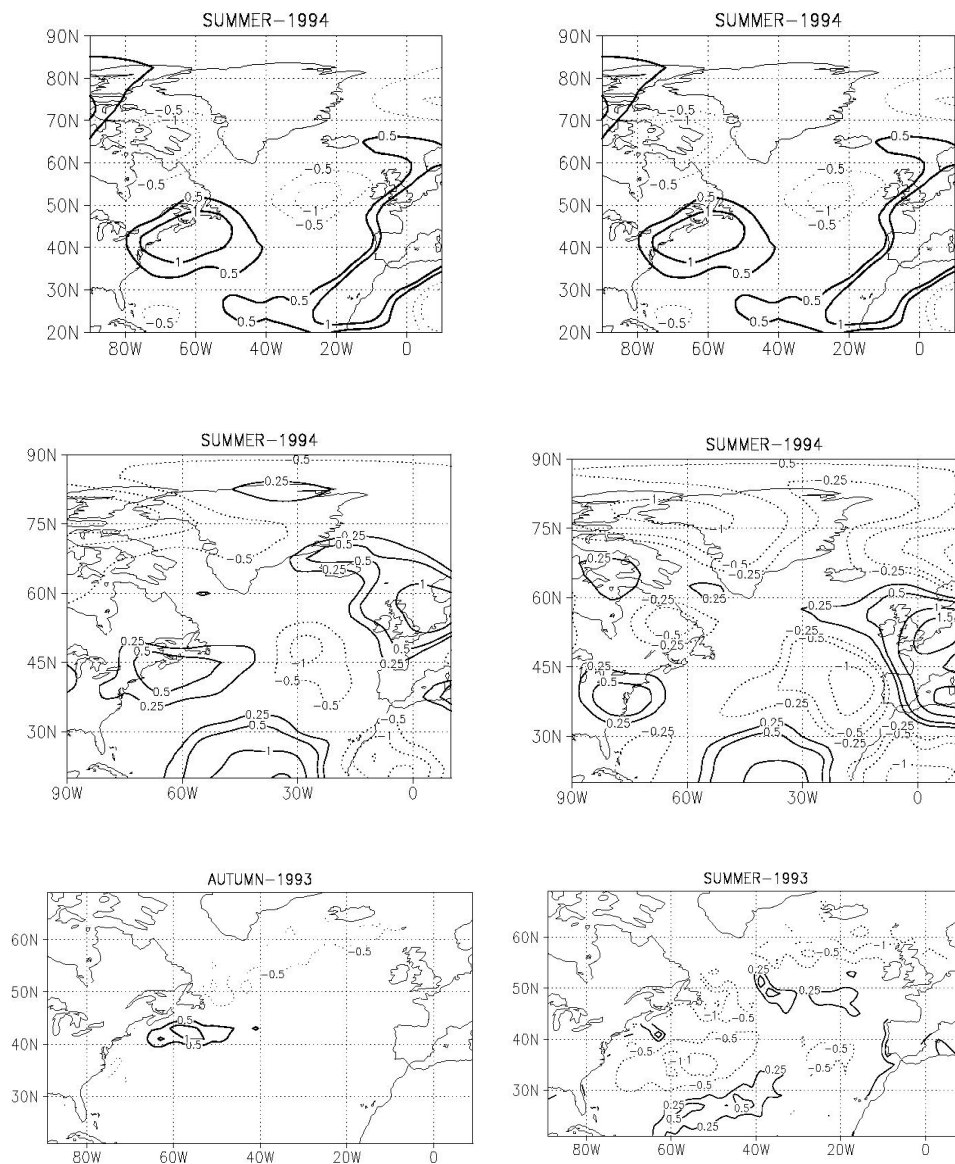


Figura 4: Campos estacionales. Ejemplo de predicción: verano de 1994. Izquierda: predicciones a 9 meses, se presentan para su comparación las observaciones (arriba), predicciones (mitad) y estado del predictor nueve meses antes (abajo). Derecha: predicciones a 12 meses, observaciones (arriba), predicción (mitad) y estado del predictor 12 meses antes (abajo).

Los estudios de casos, señalan que el verano de 1994 se predice mejor que el invierno de 1976. En ambos casos, el modelo puede reproducir fielmente el signo de las anomalías de la temperatura del aire en la mayor parte del dominio, exceptuando la zona norte, donde la habilidad de predicción presenta valores muy bajos. Sin embargo, el modelo no es tan fiable en la predicción de la amplitud de las anomalías. Hay casos en los que el valor de las anomalías se predice por defecto y en otros casos (generalmente en el esquema estacional) se predice por exceso.

Ambos ejemplos o estudios de casos, para el invierno de 1976 y el verano de 1994, indican que cuando la anomalía en el predictor es grande y persiste durante un tiempo, el modelo es capaz de captar aceptablemente bien la evolución de la temperatura del aire.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración del resto del grupo de Física del Clima de la Universidad de Alcalá: Francisco Álvarez García, William Cabos Narváez y Antonio Ruiz de Elvira. El trabajo ha sido financiado por el Programa Medio Ambiente y Clima de la Unión Europea, contrato ENV4-CT98-0714 (SINTEX).

## 7. REFERENCIAS

- BJERKNES, J. (1964): Atlantic air-sea interaction. *Adv. In Geophys.*, 10, pp. 10-82.
- BRANKOVIĆ, C., PALMER, T.N. y FERRANTI, L. (1994): Predictability of seasonal atmospheric variations. *J. Climate*, 7, pp. 217-237.
- BRETHERTON, C.S., SMITH, C. y WALLACE, J.M. (1992): An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Climate*, 5, pp. 541-560.
- JOHANSSON, A., BARNSTON, A.G., SURANJANA, S. y VAN DER DOOL, H. (1998): On the level and origin of the forecast skill in Northern Europe. *J. Climate*, 55, pp. 103-127.
- PALMER, T.N. y SHUKLA, J. (2000): Editorial. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, pp. 1989-1990.
- RATCLIFFE, R.A.S. y MURRAY, R. (1970): New lag association between North Atlantic sea temperatures and European pressure applied to long-range forecasting. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, pp. 226-246.
- RODWELL, M.J. y FOLLAND, C.K. (2002): Atlantic air-sea interaction and seasonal predictability. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, en prensa.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, E., ÁLVAREZ GRACÍA, F.J. y ORTIZ BEVIÁ, M.J. (2001): Empirical prediction of 850 hPa North Atlantic air temperature anomalies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, pp. 2761-2786.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, E., CABOS NARVÁEZ, W. y ORTIZ BEVIÁ, M.J. (2002): Sea ice anomalies as long range predictors of atmospheric conditions. *Tellus*, 54A, pp. 245-259.
- VAUTARD, R., PLAUT, G., WANG, R. y BRUNET, G. (1999): Seasonal prediction of North American surface air temperature using space-time Principal Components. *J. Climate*, 12, pp. 380-394.